

랜덤 잡음을 이용한 原子爐의 制御系  
 最適安全運轉에 관한 研究 (1)  
 (Optimization of Reactor Control System  
 by using Random Noise)

高 丙 俊\*  
 (Koh, Byung Joon)

申 載 仁\*\*  
 (Shin, Jae In)

要 約

TRIGA MARK-II 原子爐의 各出力에 對한 周波數스펙트럼을 測定하므로써 原子爐의 傳達函數의 係數率을 測定하였다.

랜덤한 과일 잡음의 檢出은 全電力에서  $10^{-7}$ A인 平行圓筒型 電離函를 利用하였다. 周波數스펙트럼은 同調型 帶域通過 濾波器를 가지고 解析하여 原子爐의 動特性과 그 파라미터를 求하고 電力測定을 하였다.

ABSTRACT

Reactor power frequency spectrum measurements at various power levels-OW, 1 KW, 50KW, 100KW were made with TRIGA-MARK-II.

An ion chamber was exposed to reactor flux, and the fluctuations in its output current were analysed in a tunable bandpass filter to get the frequency spectrum of these fluctuation.

The measured frequency spectrum of pile determined the modules of modules of zero power transfer function and indicated a prompt neutron mean life time of  $(7.90 \pm 1.62) \times 10^{-8}$  sec based on effective delayed neutron fraction of 0.0075.

The absolute value of reactor power obtained by noise analysis agreed within 5% with the power meter indication at the power below 10Kw.

1. 序 論

原子爐의 正常運轉時 出力은 대체로 時間에 따라 一定한 값을 가지고 있으나 엄밀한 測定을 하게 되면 不規則한 變動을 하고있다. 그것은 原子爐內에서 일어나고 있는 中性子の 核分裂 吸收 및 散亂의 効果와 溫度 기계적인 진동, 기타의

諸 要素에 因해 發生하는 原子爐의 雜音이다.

이 雜음을 解析하여 原子爐의 制御에 利用하는 研究는 1964年 Florida大學에서 발표된 原子爐系의 雜音解析(Noise Analysis in Nuclear Systems)에 關한 발표지임<sup>(1)</sup>에서 최초로 주목을 받기 始作했으며 비로소 이의 利用價値를 알고 활발한 研究가 進行되기 始作한 것이다.

原子爐 雜음을 利用하여 動特性과 여러 파라미터를 電力레벨, 反應度, 안전성 등을 간편하게 測定할 수 있는데 특히 測定時間이 짧고 原子爐의 正常運轉中에도 測定을 계속할 수 있는 長點이 있다. 따라서 視覺的인 爐雜音 測定解析

\* \*\*原子力研究所 電子工學研究室  
 Electronic Eng. Division,  
 Atomic Energy Research Institute.  
 接受日字: 1969年 3月 10日

裝置는 原子爐運轉時 發生되는 原子爐의 여러 因子들에 對한 變化의 情報를 제공하고 最適安全運轉을 할 수 있도록 도움을 준다.

本研究에서는 이와같은 不規則한 雜音을 利用하여 增強된 250KW 實驗用 原子爐나 動力原子爐의 最適 安全運轉을 하기 爲한 것으로 우선 100KW의 TRIGA MARK-II 原子爐의 雜音解析에 關한 實驗을 한 것이다.

實驗은 두 단계로 區分되어질 수 있는데 하나는 雜音發生器와  $^{60}\text{Co}$  Source를 利用하여 類似한 예비실험을 하고 다음은 실제의 原子爐에서 雜音解析을 함으로써 原子爐의 特性을 調查하여 在來式 方法에 依한 特性과 대조해본 것이다.

## 2. 實驗方法 및 測定機器

### 가. 實驗方法

#### ㄱ. 原子爐의 周波數特性

原子爐의 雜音은 Schottky가 發見한 電子管이나 트랜지스터內에서 放出되는 電子의 不規則한 搖動과 같은 性格을 가지고 있어서 여러 周波數의 正弦波가 重複되어 있다고 볼 수 있다. 따라서 原子爐系의 周波數에 對한 電力스펙트라를 測定하거나 혹은 周波數領域에서 여러 파라미터들의 動的特性을 쉽게 調查할 수 있다. 大部分의 原子爐들은  $10^{-4}$  cps에서부터  $10^{-5}$  cps까지의 周波數범위를 가지고 있다. 이 넓은 周波數 범위는 대략 세개의 區間으로 나누어지는데

첫째  $1 \sim 10^5$  cps 까지의 高周波部分으로 보통 Prompt neutron의 壽命時間과 reactor Shut-down margin 등을 決定할 수 있다.

둘째 區間은 약 0.05 cps에서부터 50 cps 정도의 周波數 범위를 가지고 있는데 기계적인 部分이나 水壓變動에 關한 因子들의 效果를 測定할 수 있다. 예를들면 기계적인 振動, 燃料의 굽음, 펌프의 발전, 水壓變動, gas entrainment 等이다.

셋째 區間은  $10^{-4}$  cps에서 1 cps까지의 범위로 Delayed neutron에 對한 特性과 原子爐의 溫度特性, Xenon 不安定 等에 對하여 測定할 수 있

다.

各 周波數 범위에 對하여 特別한 方法이 必要되는데 本研究는 우선 高周波 部分에 對한 雜音解析을 시도하였다.

#### ㄴ. 實驗方法

爐 雜音을 測定하기 爲한 實驗裝置의 대강은 그림 1과 같다.

原子爐에서 發生되는 雜音은 電離函에 依해서 檢出되고 增幅되어 아나라이저에 依해서 周波數別로 解析되어 記錄된다.

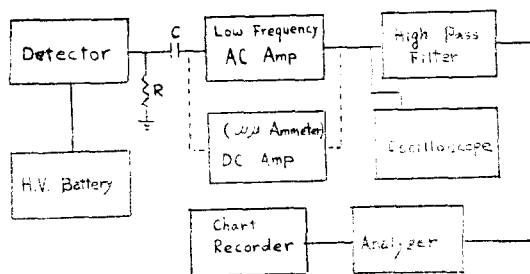


그림 1 實驗장치의 부력線圖

Fig 1 Block diagram of experimental apparatus

補償된 電離函에서 나온 電流는 低周波AC增幅器에 依해서 電壓增幅되거나 Electrometer와 DC增幅器에 依해서 檢出되는데 부하抵抗R은 爐出力에 따라  $10\text{K}\Omega$ 에서부터  $10\text{M}\Omega$ 까지 可變할 수 있으며 結合콘덴서의 값은  $0.1\mu\text{f}$ 이었다. 모든 增幅器의 周波數特性은 低周波信號發生器나 雜音發生器 그리고  $^{60}\text{Co}$  Source, 原子爐Source에 依한 White noise로 測定 較正을 한 것이다.

아나라이저의 出力은 VTVM에 依해서 RMS值로 測定되어 記錄計에 記錄되었는데 電力스펙트라를 直接 測定하기 爲해서는 다이오드의 非線型特性部分을 사용하거나 自乘電壓計를 써서 測定하는 方法도 있다. 高域濾波器는  $10^1 \sim 10^4$  周波數帶만을 解析하기 爲한 것으로 遮斷周波數를 1 cps로 하고 50 db로 감소되도록 하였다.

Background noise는 AC增幅器나 Electrometer의 入力を 短絡하여 아나라이저의 出力을 測定한 것인데 이것은 數電壓 정도의 原子爐 雜音入력이 있을 때는 무시할 수 있는 것이다.

나. 實驗機器

1. 雜音發生器 (2) (5)

眞空管內에서 發生되는 雜音은 原子爐內의 中性子核分裂 反應에 依해서 發生되는 雜音과 類似한 特性을 가지고 있으며 White noise이기 때문에 實驗에 使用될 여러 測定裝置에 對하여 原子爐 實驗을 하기 前에 充分한 校正을 할 수 있다.

眞空管 内部의 雜音源으로는 熱雜音, Shot 雜音, 二次電子放出雜音, 프리커雜音, 개스이온에 의한 雜音 등 여러가지이다.

實驗에 使用하기 爲하여 製作된 雜音發生器는 放電管을 利用하여 랜덤한 雜音의 出力을 얻도록 設計되었으며 넓은 周波數帶를 가지고 있다.

그림 2는 雜音發生器의 回路圖를 表示한다.

알근 개스로 충전된 小型管 6D4를 雜音源으로 使用하고 영구자석으로 자장을 걸어서 不必要한 放電管의 발진을 防止하고 雜音레벨을 올려주었다. 6D4는 小形이며 낮은 電力을 소비하고 眞空管들의 均一性 때문에 선택된 것이다.

放電管에서 發生되는 雜音의 主된 原因은 陰極附近에 形成되어 있는 正이온의 얇은 層의 變動 때문이다. 雜音增幅器는 一般의 線型 增幅器와는 달리 非線型 附近에서도 動作할 수 있도록 設計되어 있다.

6D4에서 나오는 雜音은 이 增幅器에 依해서 增幅되고 低濾波器를 通하여 願하는 周波數에서 遮斷되어진다. 實驗에서는 低域濾波器를 出力단에 다시 使用함으로써 原子爐의 雜音과 비슷한 스펙트럼密度를 얻도록 하였다.

그림 3은 雜音發生器의 實際回路를 그린 것이다.

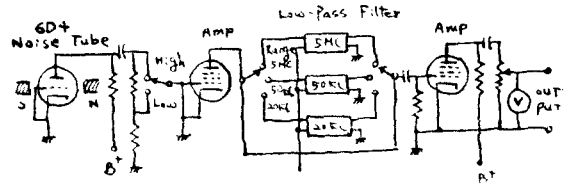


그림 2 雜音發生器의 回路圖  
Fig 2 Circuit diagram of noise generator

그림 4는 雜音發生器의 出力을 記錄한 것이며 그림 5는 遮斷周波數가 30cps일 때의 주파수 스펙트럼을 그린 것이다. 이러한 實驗을 通하여 아나라이저를 校正하였으며 各周波數에 對하여 均一한 電力스펙트럼을 얻도록 設計하였다.

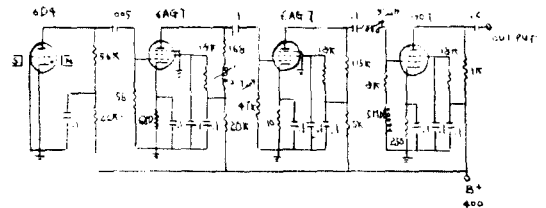


그림 3 雜音發生器의 回路  
Fig.3 Circuit of noise generator

雜音發生器의 雜音源인 放電管의 不規則한 電子의 흐름은 이상적으로 White noise로 취급되어 實驗한 것이지만 엄밀한 意味에서는 White noise가 되지 못할 것이다.

放電管 雜音의 古典의 解析은 다음과 類似하다 (4).

그림 6과 같은 간단한 回路에서 저항성분이 단위길이 당의 자기유도와 電氣容量이 各各 L

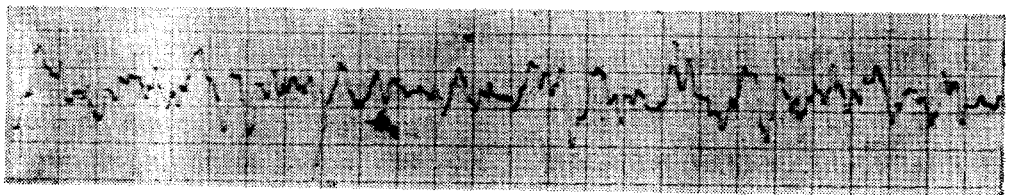


그림 4 雜音發生器의 出力 (fc=20)  
Fig.4 Output of noise generator (fc=20)

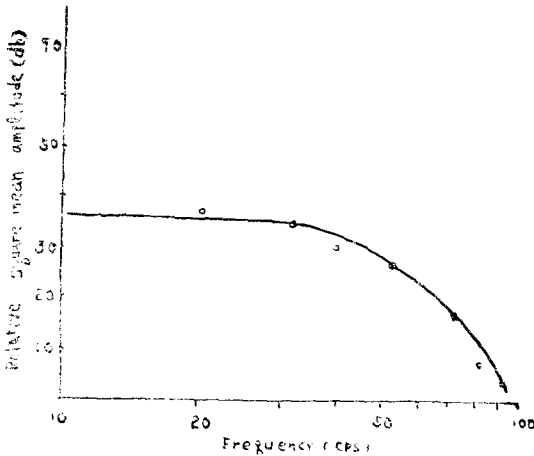


그림 5 雜音發生器의 周波數 스펙트럼  
Fig.5 Noise generator frequency spectrum

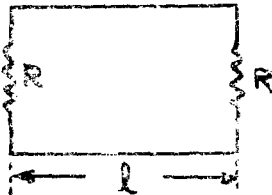


그림 6  
Fig. 6

과 C인 송전선의 兩端에서 雜音源인 純抵抗 R이 連結되어 있다고 생각할 때 정상상태에 到達된 후 兩端의 短絡으로 인한 定常波의 最小 진동수는  $f_0 = \frac{v}{2l}$  이고 이들 定常波 各各의 에너지는 kT이다.

진동수  $f_2 = nf_0$ 와  $f_1 = mf_0$  사이에 있는 진동수 帶를 생각할 때

$N = n - m$  ( $n > m$ ,  $n, m$ 은 整數) 이라면

$$N = \frac{nf_0 - mf_0}{f_0} = \frac{f_2 - f_1}{f_0}$$

이며 이 진동수 帶 안

에 들어있는 畚에너지는  $W = NkT = \frac{kT}{f_0} (f_2 - f_1)$

이며 1개의 저항 雜音源이 單位時間에 내는 出力은  $P = \frac{1}{2} \frac{W}{l/v} = \frac{kTv}{2fl} (f_2 - f_1)$ 이며  $f_0 = \frac{v}{2l}$  를

代代入하면  $P = kT(f_2 - f_1)$ 으로 電力이 溫度와 帶幅  $f_2 - f_1$ 에 比例하고 帶의 位置에는 關係하지 않는다.

여기서 雜音源을 放電管으로 代치하여 생각해도 同一하며 全周波數帶에 걸쳐서 電力이

定한 White noise인 것이다.

①. 補償된 電離函<sup>(5)(6)</sup>

Neutron Flux를 測定하기 爲하여서 Neutron-Sensitive 電離函이 設計 製作되었다. 中性子는 직접적인 電離效果를 일으키지 않기 때문에 다른 反應物質을 電離函内部에 포식하여 電離作用을 일으키도록 하여야 한다.

높은 熱 Neutron의 斷面積을 가진  $B^{10}$ 은  $B^{10}(n, \alpha) Li^7$ 의 反應으로 좋은 效果를 얻을 수 있다. 電離函은 특히 다음과 같은點에 유의하여 製作하였다.

① 電離函의 物質은 순수한 Al으로 選擇하여 Activation되는 影響을 작게 하였다.

②  $\gamma$ -線은 供給電壓差에 依하여 補正함으로써 中性子檢出을 爲한 精밀도를 높였다.

그림 7은 電離函의 概略적인 구조와 부속회로를 표시한다.  $^{60}Co$ 의  $\gamma$ -線源으로서 外部 電離函과 内部 電離函의 電流量을 電壓別로 測定하여 같은 電流가 되도록  $E_1$ 과  $E_2$ 를 調整하여  $\gamma$ -線에

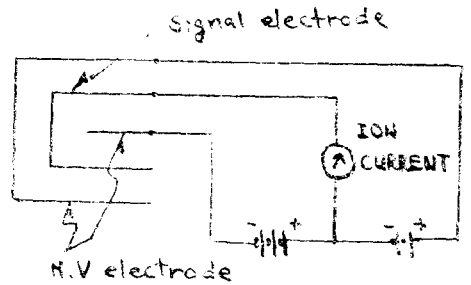


그림 7 電離函  
Fig. 7 Ionization Chamber

對한 補正을 한 것이다.

③ 内部 電離函의 極板에 홀을 만듦으로서 Boron Coating의 표면적을 넓혀서 感度가 좋도록 하였다. Boron Coating은  $0.1 \text{ mg/cm}^2$ 로서 全體 407mg을 所要하였다.

電離函은 가장 높은 Neutron flux가 있으며 同時에 核分裂時 發生되는 核分裂生成物에서 멀리 떨어진 곳에 位置시킴으로서 우리가 要求하는 Pile noise의 測定에 오차를 작게 하였다.

電離函의 電源은 電池로 하였으며 感度는 약 3.5 Count/Sec-per unit neutron flux이며



어 L, C와 R로 구성된 帶域通過濾波기를 통하여 周波數別로 解析된다. 적당한 L과 C의 선택으로 1cps에서 10<sup>5</sup>cps까지의 공진주파수를 얻을 수 있으며 L은 높은 Q값(약 10以上)을 가진 低周波초크를 사용하여 20Henry까지 變化시킬 수 있다. R는 低周波發生기와 雜音發生기에 의해서 全周波數에 걸쳐서 一定한 入力전압이 유지 되도록 조정되었으며 遮蔽되었다.

濾波기에 의하여 선택된 주파수 성분의 진폭은 線形 VTVM에 의해서 測定된다. 實際적으로는 Mean Square Amplitude를 測定해야 되기 때문에 二乘電壓計를 사용하면 좋다. 本實驗에서는 간편한 線形 VTVM을 사용하여 직접 스펙트럼을 測定하였다.

특히 아나라이저는 雜音을 피하기 爲하여 B<sup>+</sup>도 電池로 공급하였다.

아나라이저에 解析되는 雜音은 濾波器의 공진 특성이나 增幅器의 周波數特性에 따라 매우 달라짐으로 低周波發生기와 雜音發生기 그리고 <sup>60</sup>C. Source로 較正과 補正을 하여주어야 한다.

그림 12는 아나라이저의 실제 회로를 표시한다.

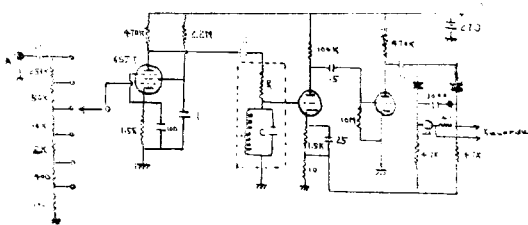


그림 12 아나라이저의 회로  
Fig. 12 Circuit of analyzer

3. 理論 및 實驗結果

가. 雜音源

眞空管內의 熱電子 電流가 不規則하게 搖動된다는 것은 Schottky에 의해서 發見되었다. 이것은

$$\langle |I|^2 \rangle = 2e^2 \bar{m} \tag{1}$$

로 表示된다.

단  $\langle |I|^2 \rangle$  : 電子管에 흐르는 電流雜音의 스펙트라密度

$\frac{e}{m}$  : 電子의 電荷(Coulombs)  
 $\bar{m}$  : 電子의 平均個數(個/sec)

이와 類似하게 原子爐內의 中性子運動의 不規則한 搖動은 Cohn<sup>(9)</sup>에 의하면

$$\langle |S_0|^2 \rangle = 2 \sum_i q_i^2 \bar{m}_i \tag{2}$$

로 쓸 수 있다.

단  $\langle |S_0|^2 \rangle$  : 雜音源의 스펙트라密度 (Neutrons<sup>2</sup>/sec)

$q_i$  : i번째의 核反應에서 생기는 中性子의 數

$\bar{m}_i$  : i번째의 原子爐內에서 核反應의 平均값

原子爐에서 N개의 Prompt Neutron에 의해서 發生되는 fission의 平均率은  $\frac{n}{l^*} \frac{F}{A+F} P_N$  이며 漏泄를 포함한 Nonproductive absorption은  $\frac{n}{l^*} \frac{A}{A+F}$  임으로 臨界條件에서

$$\bar{\nu} F / (A+F) = 1 \tag{3}$$

이다.

A : 모든 Nonproductive neutron absorption의 macroscopic cross section

F : fission이 일어나는 吸收의 Macroscopic cross section

n : Total number of neutrons in the reactor

$l^*$  : Prompt neutron life time

$\bar{\nu}$  : average number of neutrons per fission (both prompt and delayed neutrons)

$P_N$  : 한 Fission에서 N개의 Prompt neutron이 生成될 확률

$$\sum_{N=1}^{\infty} P_N = 1 \tag{4}$$

$$\sum_{N=1}^{\infty} N P_N = (1 - \beta) \bar{\nu} \tag{5}$$

임으로 (2)는

$$\langle |S_0|^2 \rangle = \frac{2n}{l^* (A+F)} \langle A+F \sum_{N=1}^{\infty} (N-1)^2 P_N \rangle \tag{6}$$

로 쓸 수 있으며 (3) (4) (5)를 代入하면

$$\langle |S_0|^2 \rangle = \frac{2n}{l^*} \left\langle \frac{\nu^2 - \nu}{\nu} \right\rangle \tag{7}$$

이 된다. 단  $\bar{v}^2 \simeq \sum_{N=1}^{\infty} N^2 P_N$ 이다.

아주 작은 反應度搖動을  $\rho$ 라 할때 단위시간의 Neutron의 變化量은  $\rho n/l^*$ 이며 그 스펙트라密度는

$$\langle |\rho|^2 \rangle = \left(\frac{l^*}{n}\right)^2 \langle S_0^2 \rangle \quad (8)$$

로 표시할 수 있다.

(7)을 (8)에 代入하면

$$\langle |\rho|^2 \rangle = \frac{2l^*}{n} \left\langle \frac{\bar{v}^2 - \bar{v}}{\bar{v}} \right\rangle \quad (9)$$

로 간단히 된다.

#### 나. 雜音에 의한 임계측정의 오차

原子爐出力의 오차는 여러 要因이 많으며 Pile 雜音에 의한 오차는 다음 식으로 計算된다.

$$\sigma^2(t) = \left\langle \frac{1}{t} \int_0^t \rho(t') dt' \right\rangle^2 \quad (10)$$

즉 平均 反應度の 變化量을 t sec에 걸쳐서 적은 平均한 것이다.

(10)은 Bennett<sup>(10)</sup>에 의하면

$$\sigma^2(t) = \frac{1}{2\pi^2 t^2} \int_0^{\infty} \frac{1 - \cos 2\pi f t}{f^2} \langle |\rho|^2 \rangle df \quad (11)$$

로 나타나며 곧

$$\sigma^2(t) = \frac{1}{2t} \langle |\rho|^2 \rangle \quad (12)$$

이 된다. (9)를 (12)에 代入하면

$$\sigma^2(t) = \frac{l^*}{nt} \frac{\bar{v}^2 - \bar{v}}{\bar{v}} \quad (13)$$

$$\sigma(t) = 0.89/\sqrt{R} \quad (14)$$

$$\sigma(t) = 5.1 \times 10^{-6} / \sqrt{Wt} \quad (15)$$

로 Cohn<sup>(9)</sup>에 의해서 略化되었다.

R: t秒 동안에 일어나는 Total Number of Fissions

W: 原子爐出力

#### 다. Source Transfer Function

原子爐 Source의 反應度搖動은 結局은 原子爐 電力레벨의 搖動을 誘發할 것이다. 한 구름에 대하여 動特性方程式을 이용하면

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\beta}{l^*} [n_0 + n(t)] + \sum_i \lambda_i [C_{i0} + C_i(t)]$$

$$+ S(t) \quad (16)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{l^*} [n_0 + n(t) - \lambda_i [C_{i0} + C_i(t)]] \quad (17)$$

여기에서  $n_0$ 와  $C_{i0}$ 는 定常部이며  $n(t)$ ,  $C_i(t)$ 는 搖動部이다.

原子爐가 Critical하다면 定常源은 없으므로

$$\frac{\beta n_0}{l^*} = \sum_i \lambda_i C_{i0} \quad (18)$$

$$\frac{\beta_i n_0}{l^*} = \lambda_i C_{i0} \quad (19)$$

이며  $n(t)$ ,  $C_i(t)$ ,  $S(t)$ 가 삼각함수로 표시된다고 가정하면

$$n(t) = n(f) e^{i2\pi f t} \quad C_i(t) = C_i(f) e^{i2\pi f t}$$

$$S(t) = S(f) e^{i2\pi f t} \quad (20)$$

零電力에서의 Transfer Function  $T(f)$ 는

$$T(f) = \frac{n(f)}{S(f)} = \frac{l^*}{2\pi i f L + B} \quad (21)$$

이다. 여기에서

$$L = l^* + \sum_i \frac{\lambda_i \beta_i}{(2\pi f)^2 + \lambda_i^2}$$

$$B = \beta - \sum_i \frac{\lambda_i^2 \beta_i}{(2\pi f)^2 + \lambda_i^2} \quad (22)$$

原子爐에서의 搖動의 스펙트라密度는

$$\begin{aligned} \langle |n(f)|^2 \rangle &= |T(f)|^2 \langle |S_0|^2 \rangle \\ &= \frac{2nl^*}{(2\pi fL)^2 + B^2} \left( \frac{\bar{v}^2 - \bar{v}}{\bar{v}} \right) \end{aligned} \quad (23)$$

#### 라. 電離函의 檢出效果

Pile 雜音을 測定하기 爲해서는 電離函과 같은 測定裝置가 介入되어야 한다.

一般的으로 이러한 檢出器는 Neutron을 吸收하여 電氣의인 信號를 내도록 設計되어 있다.

原子爐속의 中성자를 檢出하는 電離函의

Fraction을  $\epsilon$ 라 하면 흐르는 平均電流 I는

$$\bar{I} = \epsilon q p / l^* \quad (24)$$

이다. 여기서 q는 Neutron에 의해서 변환되는 전자량이다.

電離函의 電流 I의 搖動은 두가지의 原因으로 나눌 수 있으며 하나는 Pile 雜音에 의한 것으로

$$\langle |I_p(f)|^2 \rangle = \frac{2n\epsilon^2 q^2}{l^{*2} [(2\pi fL)^2 + B^2]} \left( \frac{\bar{v}^2 - \bar{v}}{\bar{v}} \right) \quad (25)$$

로 나타나며 다른 하나는 電離函에 作用하는 中性子에 依한 雜音으로 White Noise로 취급된다.

$$\langle |I_c(f)|^2 \rangle = 2q^2 \frac{\epsilon n}{l^*} \quad (26)$$

따라서 全電流雜音은

$$\langle |I(f)|^2 \rangle = \langle |I_p(f)|^2 \rangle + \langle |I_c(f)|^2 \rangle \quad (27)$$

$$\langle |I(f)|^2 \rangle = 2q^2 \frac{\epsilon n}{l^*}$$

$$\left[ 1 + \frac{E}{(2\pi fL)^2 + B^2} \left( \frac{\bar{v}^2 - \bar{v}}{\bar{v}} \right) \right] \quad (28)$$

이다. 따라서 電離函의 效率  $\epsilon$ 는  $(2\pi fL)^2 + B^2$ 의 값보다 훨씬작아 Pile雜音을 檢出할 수 있으며  $\epsilon$ 의 限界値가 수십사이클의 주파수대에서는  $5 \times 10^{-5}$  以上으로 되어야 한다.

다. 雜音을 利用한 原子爐 出力의 測定

Zero Power 傳達函數 T(f)는 (21)에서

$$|T(f)|^2 = \frac{l^{*2}}{(2\pi fL)^2 + B^2} \quad (25)$$

단일 주파수 f가 Delayed neutron decay constant  $\lambda_i$ 보다 훨씬 클 때에는 L과 B는  $l^{*2}$ 와  $\beta_{eff}$ 로 쓸 수 있으며

$$|T(f)|^2 = \frac{l^{*2}}{(2\pi f l^{*2})^2 + \beta_{eff}} \quad (29)$$

이 된다. (27)에서

$$\langle |I(f)|^2 \rangle = \langle |I_p(f)|^2 \rangle + \langle |I_c(f)|^2 \rangle \text{이며} \quad (24) \text{ (25) (26) 을 利用하면}$$

$$\begin{aligned} |I_p(f)|^2 &= \frac{2n\epsilon^2 q^2}{l^{*2} [(2\pi fL)^2 + B^2]} \left( \frac{\bar{v}^2 - \bar{v}}{\bar{v}} \right) \\ &= \frac{2n\epsilon^2 q^2}{l^{*2}} |T(f)|^2 \left( \frac{\bar{v}^2 - \bar{v}}{\bar{v}} \right) \end{aligned} \quad (30)$$

$$\langle |I_c(f)|^2 \rangle = \frac{2q^2 \epsilon n}{l^*} = 2ql \quad (31)$$

따라서 電離函의 平均電流의 自乘과 爐雜音의 電力密度의 比는

$$\begin{aligned} \frac{\langle |I_p(f)|^2 \rangle}{I^2} &= \frac{2l^{*2}}{n} \frac{\frac{\bar{v}^2 - \bar{v}}{\bar{v}^2}}{(2\pi fL)^2 + B^2} \\ &\approx 0.795 \frac{2l^{*2}}{n\beta^2} = \frac{1.59\lambda l^{*2}}{n\beta^2} \end{aligned} \quad (32)$$

爐의 出力은

$$W = \frac{nQ}{\beta l^*} \quad (\text{Watt}) \quad (33)$$

인 것을 이용하면

$$\begin{aligned} \frac{\langle |I_{p0}(f)|^2 \rangle}{I^2} &= \frac{1.59 l^{*2} \bar{v}}{W \left( \frac{\beta l^{*2}}{nQ} \right) n \beta^2} = \frac{1.59 Q}{W \beta^3} \\ &= \frac{5.1 \times 10^{-11}}{W \beta^2} \end{aligned} \quad (34)$$

여기서 Q는  $3.2 \times 10^{-11}$  Watt-Sec fission 이고

$\langle |I_{p0}(f)|^2 \rangle$ 은  $f \ll \frac{\beta}{l}$  일 때의  $\langle |I_p(f)|^2 \rangle$ 이다.

(30)과 (31)에서

$$\frac{\langle |I_{p0}(f)|^2 \rangle}{\langle |I_c(f)|^2 \rangle} = \frac{0.795}{\beta^2} \epsilon \quad (35)$$

(31)에서

$$q = \frac{\langle |I_c(f)|^2 \rangle}{2I} \quad (36)$$

임으로 (35)에 代入하면

$$\begin{aligned} \frac{\langle |I_{p0}(f)|^2 \rangle}{\langle |I_c(f)|^2 \rangle} &= \frac{\langle |I_{p0}(f)|^2 \rangle}{2ql} \\ &= \frac{I}{2q} \cdot \frac{5.1 \times 10^{-4}}{W} \end{aligned} \quad (37)$$

(35), (37)에서

$$W = \frac{5.1 \times 10^{-4}}{0.795 \times 2ql \epsilon} = 3.2 \times 10^{-11} \frac{I}{\epsilon \epsilon} \quad (39)$$

바. Prompt neutron의 壽命時間

(28)에서 관측되는 雜音의 스펙트럼은

$A + \frac{B}{\alpha^2 + \omega^2}$ 에 비례하여 관측되며 여기에서

$$\alpha = \frac{\beta}{l}$$

A=White雜音成分 (40)

$\frac{B}{\alpha^2 + \omega^2}$  = Pile雜音成分이다.

(40)은 실험測定値와 비교해서 적용되어지는 공식이다. A, B 상수를 決定하기 爲해 최소 차승의 法則을 利用하여

$$S = \sum_i (n_i^2 - A - \frac{B}{\alpha^2 + \omega_i^2})^2 \quad (41)$$

$n_i$ 는 주파수  $\omega_i$ 에서 關측되는 규격화된 Mean Square Amplitude이다.

(41)을 A, B와  $\alpha$ 에 대하여 미분하고 零으로 놓고 풀면  $\alpha$ 와 A, B의 상수가 決定되어.

$F(\alpha, n_i^2, \omega_i) = 0$ 의 함수로 표시되고 실험 데이



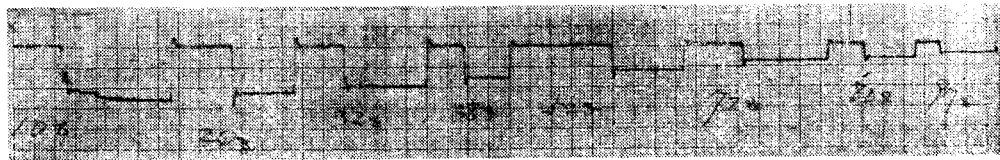


그림 13 雜音發生器—아나라이저出力  
Fig. 13 Noise generator—Analyzer output

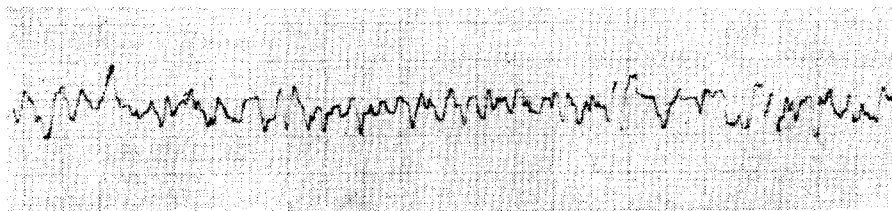


그림 14 파일雜音  
Fig. 14 Pile noise

타에 의해서  $\alpha$ 를 구할 수 있다. 또한 (40)을 電力 테시셀로 환산하여 그래프에서  $\frac{\beta}{f}$ 의 遮斷周波數로 구할 수도 있다<sup>(12)</sup>.

#### 사. 測定結果 및 解析

雜音發生器를 이용한 실험은 Fig-5에서 나타난 것과 같은 스펙트럼을 얻었다. 各 周波數에 對한 出力 역시 搖動을 하고 있음으로 지정수보다 약간 큰 시간 간격으로 측정치를 얻어서 平均하였는데 이 때 記錄計의 속도조절로서 쉽게 判讀하였다.

그림 13은 雜音發生器 出力의 遮斷周波數가 30cps일 때의 아나라이저 出力을 記錄計로 기록한 것이다.

그림 14는 100kw 때의 Pile 雜音을 記錄計로서 기록한 것인데 이 雜音은 DC 增幅器로 增幅된 것이다.

그림 15는 0w, 1kw, 50kw, 100kw 때의 Pile 雜音의 스펙트럼을 測定한 것이다.

중電力에 대한 傳達函數는  $\frac{1}{\alpha + \omega^2}$ 에 비례하므로 (41)을 이용하여  $\alpha$ 를 計算하던 94.89이며 따라서 TRIGA MARK-II 爐의 Prompt neutron life time은 79.03  $\mu$ sec이다. 그림 16은  $\alpha=94.89$  일 때의 실험적인 周波數 스펙트럼을 그린 것이다.

그림 15에서 周波數範圍는 10cps 以上の 것

을 取하였으므로 共振現象이 없었으나 線電壓의 降下와 不安定은 약간의 60 $\approx$  형을 초과하였고 Back-ground 測定으로 補正되었다.

중電力에서와 1kw에서는 差傳達函數에 상당히 一致하는 현상을 보인다. 높은 出力으로 갈수록 Pile 雜音으로 因해서 White하지 못하는 현상을 볼 수 있다.

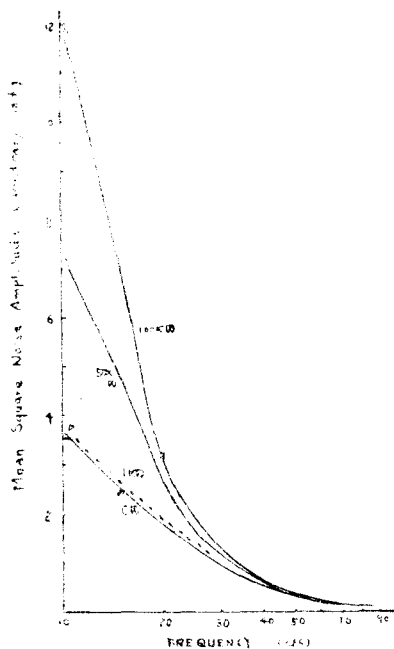


그림 15 파일雜音 電力스펙트럼  
Fig. 15 Pile noise—Power spectrum

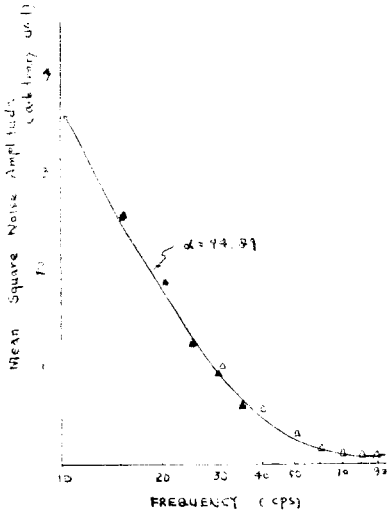


그림 16 TRIGA MARK-II의 파일잡음스펙트럼  
Pile noise spectrum from  
TRIGA MARK-II

Prompt neutron의 壽命時間은 effective delayed neutron fraction을 0.0075로 하여 計算한 것이다.

그림 17은 (39)에 의한 爐電力計와 雜音方法에 의한 爐電力를 비교하여 그린 것이며  $q$ 는 Shröder(13)가 발견한 값  $2.62 \times 10^{-5}$  Amp-Sec를 참고로 하였다.

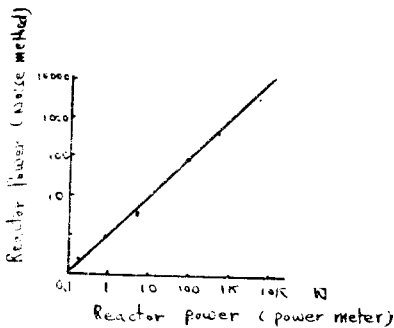


그림 17 原子爐出力의 較正  
Fig. 17 Reactor power calibration

#### 4. 結 論

爐雜音을 解析하여 爐의 動特性和 傳達함수 그리고 各 파라미터들에 對한 情報를 손쉽게 얻

을 수 있음으로 이것은 앞으로의 原子爐 制御에 매우 有用할 것이다.

高周波領域에서는 Prompt Neutron의 壽命時間과 零 傳達函數를 알 수 있으며 高電力일수록 pile 雜音이 White雜音과는 다르다는 사실을 認知할 수 있다. 아직도 低周波領域에 對하여서 實驗을 계속중이지만 一般적으로 高電力에서 나타나는 共振現象을 解析하면 爐에 對한 雜音 分析이 될 것이다.

#### 참 고 문 헌

1. Noise Analysis in Nuclear Systems, AEC Symposium Series 4
2. W.R. Bennett, Electrical Noise P141 1960.
3. J.D. Cobine, Electrical Noise Generators P875. Proceedings of the I.R.E.
4. F.W. Sears, Thermodynamics, P371, 1962.
5. W.J. PRICE, Nuclear Radiation Detection P258 1958
6. H.S. McCreary, Jr. & R.T. Bayard, A neutron sensitive ionization chamber with electrically adjusted r compensation Vol. 25, No. 2 1954. The Review of Scientific Instrumentations
7. 高丙俊, 原子力研究年報 P301 1964.
8. C.E. Cohn, Determination of reactor kinetic parameters by pile noise analysis 5. 331-335 (1959) N.S. & E.
9. C.E. Cohn, A Simplified theory of pile noise 7. 4272-475 (1960) N.S. & E.
10. E.F. Bennett, Nuclear Science & Engineering 8. 53-61 (1960)
11. Walter, H. Zinn & Jerome, Do Luntz, Control of Nuclear Reactor & Power plants P208, McGraw-Hill 1955.
12. 鈴木穎二 etc

- Present status of Nuclear Reactor Instrumentation & Control (II).  
日本原子力學會誌 Vol. 9, No.6 (1967).
13. Shröder, V.R.  
Nucleonik 4 [5] 227 1962.
14. Shuji YAMADA  
Reactor Noise Analysis of Swimming Pool  
Vol.1, No.4 130—136 (1964) (J) (N.S.&T)
15. SeiJi UKAI  
A generalized Analysis of Rossi- $\alpha$  Experiment 2(9) 35—362 (1965.9) (J) N.S. & T.
16. J. Douglas. Balcomb.  
Acrosscorrelation method for measuring the impulse response of reactor systems.  
Nuclear Science & Engineering 11, 159—166 (1961).
17. E. F. Bennett  
The Rice Formulation of Pile Noise  
8, 53—61 (1960) N. S. & E
18. C.W. Griffin & R.L. Randall.  
At Power, Low frequency, Reactor-Power-Spectrum.  
Measurements and Comparison with Oscillation measurements.  
15, 131—138 (1963) N. S & E
19. W.B. Davenport, Jr. & W.L. Poot  
An introduction to the theory of random Signals & noise P171. 1958.
20. Collateral reading material for the TRIGA MARK-II Reactor Training Program  
P.3. GA-885.

GA, Division of General Dynamic Corporation  
21. 爐雜音 解析 專門委員會의 活動  
日本原子力學會誌 Vol. 9, No, 8, 1967.

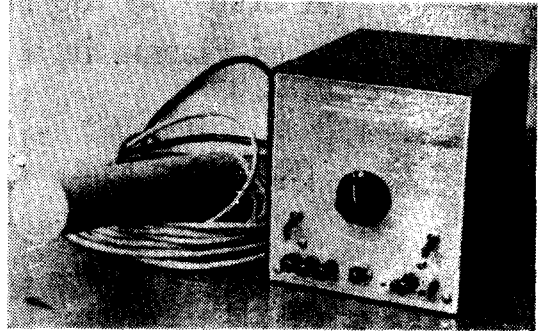


사진 1 Ionization Chamber  
電離函

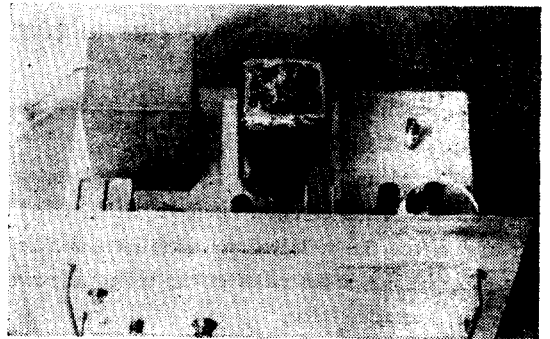


사진 2 Noise Generator  
雜音發生裝置